

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.032

大豆豆荚炭疽病严重度的光谱检测*

冯雷¹ 陈双双¹ 冯斌² 何勇¹ 楼兵干³

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 全国农业展览馆, 北京 100026;

3. 浙江大学生物技术研究所, 杭州 310058)

【摘要】 利用可见/近红外光谱技术对大豆豆荚炭疽病严重度进行检测。分别采用主成分分析法(PCA)结合反向传输人工神经网络(BPNN)和连续投影算法(SPA)结合BPNN 2种组合模型进行分析预测。利用SPA的数据压缩功能和BPNN的学习预测能力实现对大豆豆荚炭疽病严重度的检测。以样本检测的准确率作为模型评价指标。实验结果显示SPA-BPNN的检测准确率最高,为90%。研究表明,SPA能够有效地进行波长选择,使BPNN模型获得满意的检测率。

关键词: 大豆 可见/近红外光谱 连续投影算法 反向传输人工神经网络 主成分分析 偏最小二乘法

中图分类号: O657.3; S435.621.2⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0175-05

Spectral Detection on Disease Severity of Soybean Pod Anthracnose

Feng Lei¹ Chen Shuangshuang¹ Feng Bin² He Yong¹ Lou Binggan³

(1. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. National Agriculture Exhibition Center, Beijing 100026, China

3. Institute of Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract

Visible and near infrared reflectance (Vis/NIR) spectroscopy technique was applied to detect the disease severity of soybean pods anthracnose. Principal component analysis (PCA) combined with back propagation neural network (BPNN) and successive projections algorithm (SPA) combined with BPNN were used as two methods to analyze and prediction of the disease severity of soybean pods anthracnose. Data compression of SPA and learning ability of BPNN was used to achieve the detection of anthracnose severity on soybean pods. The accurate rate of identification was used to evaluate the model. The results of experiment showed that SPA-BPNN was the better calibration model and the accurate rate of detection was 90%. According to the results, SPA was a powerful way for the selection of effective wavelengths, and BPNN model could obtain the accurate detection.

Key words Soybean, Vis/NIR spectroscopy, Successive projections algorithm, Back propagation neural network, Principal component analysis, Partial least squares

引言

大豆豆荚炭疽病(*Colletotrichum truncatum*)是引

起鲜食豆荚品质下降的主要因子,严重影响了出口贸易与农户的经济效益^[1-3]。及时使用杀菌剂可以在一定程度上控制该病,降低损失,这主要依赖于农

收稿日期: 2011-09-04 修回日期: 2011-09-22

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100705)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD21B04)、国家自然科学基金资助项目(61075017、60605011)、浙江省科技厅重点农业资助项目(2006C22022)、浙江省重大科技专项重点农业资助项目(2009C12002)和浙江省自然科学基金资助项目(Y5090044)

作者简介: 冯雷,副教授,主要从事数字农业和多光谱检测技术研究,E-mail: lfeng@zju.edu.cn

通讯作者: 楼兵干,副教授,主要从事植物病理学研究,E-mail: bglou@zju.edu.cn

技术人员或有经验的生产者基于田间观察后作出的正确诊断结果。田间观察费时费力,难以在大范围内开展,且受到观察者自身经验的影响。国内外学者利用可见/近红外光谱技术在病虫害监测、诊断方面做了大量的研究,利用光谱指数或特征波段对多种病虫害严重度进行了估算检测研究。黄木易等对小麦叶片条锈病的严重度进行反演^[4];吴迪等对茄子叶片的灰霉病进行了检测研究^[5];Bravo等利用可见光到近红外波段的光谱反射率数据对小麦黄锈病进行了早期诊断^[6];Malthus等用地物光谱仪研究大豆和蚕豆斑点葡萄孢子感染后的反射光谱,发现其一阶反射率要高,可用来监测病虫害的感染发生情况^[7];Adams等利用大豆黄萎病光谱二阶导数设计的发黄指数对病情评价进行了研究^[8];Muir等研究了马铃薯块茎在感染病害而又在肉眼未能观测到的阶段的光谱反射率,以实现早期诊断^[9];但对大豆豆荚炭疽病病害严重度的检测研究还未见报道。大豆豆荚炭疽病主要发生在大豆结荚以后,尤其是鼓粒期。病斑初为水渍状的褐色细条斑,后扩大为条状或不规则状,呈黄褐色或红锈色,严重时连成不规则大斑,发病面积可占整个豆荚的50%以上。本文利用可见/近红外光谱技术获取豆荚0%、5%、25%和50%的炭疽病严重度的光谱信息,采用连续投影算法(SPA)和反向传输人工神经网络(BPNN)信息处理系统,建立大豆豆荚炭疽病病害严重度检测模型。

1 材料与方法

1.1 仪器设备和分析软件

实验使用美国ASD公司的FieldSpec Handheld型光谱仪,其波长范围325~1 075 nm,采样间隔为1.5 nm,分辨率为3.5 nm,探头视场角为20°,光谱扫描次数设定为30次。实验安排在室内进行,以减少外界环境对光谱采集的干扰。实验光照采用14.5 V的卤素灯模拟自然光光源,减少因日光随时间变化所造成的影响。光谱数据以ASCII码形式导出进行处理,分析软件采用ASD View Spec Pro、Unscrambler V9.8、Matlab R2009b和Data Process Software(DPS)。

1.2 样品来源及光谱获取

本实验采用浙江大学实验田间自然发病的鲜食大豆“台75”鼓粒饱满期豆荚,取健康和不同患病严重度(5%、25%、50%)的单豆荚作为测定样本,实验总共采集了大小与成熟度基本一致的200个大豆豆荚样本,150个大豆豆荚用于建模,其中完全健康、患病严重度为5%、25%和50%豆荚分别为36、

38、38和38个;而剩余50个大豆豆荚作为预测样本。在对光谱仪进行反射率为1的标准白板光谱校正后,探头与大豆豆荚表面的距离控制在12 cm左右,用光谱仪探头逐个对准每个豆荚的中心进行光谱采集,以减少背景的干扰。每个样本重复扫描3遍,每遍扫描30次,并通过计算机自动保存。整个光谱采集过程中,光谱仪、卤素灯以及样本放置的位置固定,如图1所示。

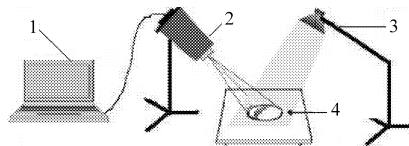


图1 光谱采集系统

Fig. 1 Spectral measurement system

1. 计算机 2. 光谱仪 3. 卤素灯 4. 大豆豆荚

1.3 光谱数据预处理

采集到的光谱信号中不仅有反映样本特征的信息,同时还包含高频随机噪声、基线漂移、样本不均匀、光散射等干扰,所以在对光谱数据进行建模之前,需要通过一定的预处理方法来减少干扰对建模的影响。由于存在系统误差,光谱曲线在首尾端有较大的噪声,会直接影响实验的准确性,因此数据处理时只研究波长范围401~1 000 nm的光谱数据。分别对光谱数据进行附加散射校正(multiplicative scatter correction,简称MSC)、平均平滑算法(smoothing moving average,简称SMA)和变量标准化(standard normal variate,简称SNV)处理,再利用偏最小二乘法(PLS)分析。所有预处理过程都在Unscrambler V9.8软件中进行。

2 结果与分析

2.1 可见/近红外光谱图分析

由于测量到的光谱两端存在噪声,因此选用波长范围401~1 000 nm内共600个变量进行分析。图2显示了不同病害严重度的大豆豆荚可见/近红外光谱。随着大豆豆荚炭疽病严重度的增加,光谱曲线会发生一定的变化,这说明光谱曲线和病害严重度之间存在一定程度的相关性。但是仅仅从光谱特征上还是难以对病害严重度进行分级,主要是因为影响反射率的因素很多,不仅由病原菌的侵染引起,还有一些其他的因素,如大豆豆荚的长势、营养成分含量等。这些因素都会对豆荚表面的形状、颜色、纹理等外部特征以及含氮量、含水率等内部特征产生影响,从而造成光谱曲线并不全因病害严重度而呈规律性分布。因此,仅仅通过光谱曲线直观地进行检测大豆豆荚的病害严重度是不可行的,需要

通过进一步的化学计量学方法挖掘光谱曲线中的信息。

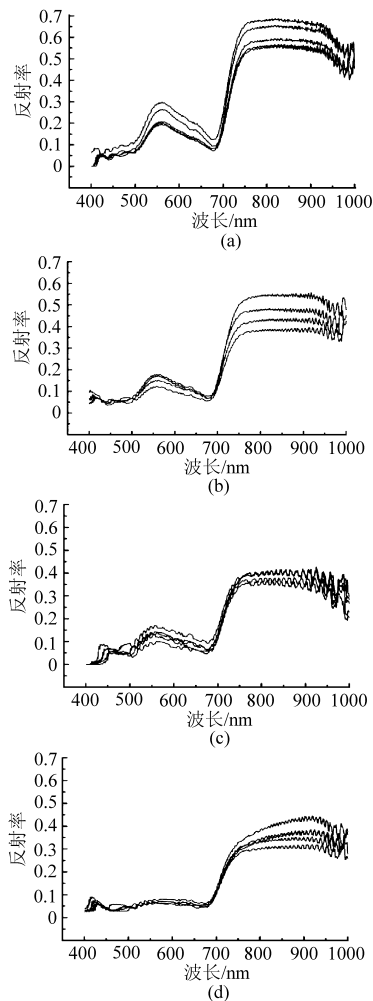


图 2 不同病害严重度的大豆豆荚可见/近红外光谱
Fig. 2 Reflectance spectra of different disease severity on soybean pods anthracnose

(a) 完全健康 (b) 病害严重度 5%
(c) 病害严重度 25% (d) 病害严重度 50%

2.2 偏最小二乘法模型分析

因每个样本保存了 3 次,而建模时每个样本只需一组数据,为保证光谱数据具有代表性,用 ASD 光谱仪自带的 ASD View Spec Pro 软件将保存 3 次的的数据取平均,将平均值作为样本的光谱反射率数据。在建立分析模型前,为了得到更加准确和稳定的模型,分别对光谱数据进行 MSC、SMA 和 SNV 预处理。

PLS 是一种很有效的多元统计方法,本质上是一种基于特征变量的回归方法,广泛用于可见/近红外光谱数据的处理。偏最小二乘法在对量测矩阵进行分解的同时,对响应矩阵也进行正交分解,并在这 2 个矩阵间建立定量关系,这就使得对多个量测响应的预测成为可能。在本文中,量测矩阵为不同预处理后的光谱数据矩阵,量测响应矩阵为大豆豆荚

炭疽病严重度的矩阵。最后,用偏最小二乘法对光谱数据矩阵与病害严重度矩阵进行回归分析。

阈值是作为衡量预测大豆豆荚炭疽病严重度的临界值和判别精确程度的指标,是以预测值减去真实值的绝对值为依据判别严重程度的临界值。通过对比预测值与真实值差的绝对值是否在阈值之内来判断预测是否正确,因此阈值设定值越小、正确识别率越高时,模型的稳定性和精确度就越高,且得出的预测结果也更具有说服力。随着阈值的减小,即精度要求的提高,3 种预处理下的 PLS 模型的预测准确率呈下降趋势。通过计算,PLS 在 3 种不同预处理下的预测结果如表 1 所示。由表 1 可知,SNV 预处理下的 PLS 模型预测的准确率优于其他 2 种预处理,当阈值为 ± 0.5 时,该 PLS 模型的预测准确率为 80%,获得了较为满意的结果;当阈值为 ± 0.2 时,该 PLS 模型的预测准确率仅为 48%。但作为后续大田信息检测的应用,该模型使用了 401 ~ 1 000 nm 共 600 个变量的信息,计算量大,处理时间长,且模型的精度有待提高,因此需要有效的波长选择方法进一步优化模型。

表 1 不同预处理下的大豆豆荚炭疽病严重度预测准确率
Tab. 1 Predicting precision of disease severity on soybean pods anthracnose under different pretreatments %

预处理方法	阈值	
	± 0.5	± 0.2
MSC	72	30
SMA	74	28
SNV	80	48

2.3 主成分分析

主成分分析法是模式识别判别分析中最常用的一种线性映射方法。其目的是将数据降维,在不丢失主要光谱信息的前提下选择为数较少的新变量来代替原来较多的变量,以排除众多化学信息共存中相互重叠的信息^[10-11]。由于建模的数据量太大会影响学习速率和模型精度,而且由于信息中还夹杂着噪声等干扰,也会对模型的建立造成影响,因此通过主成分分析(PCA)对原始光谱数据降维压缩以提高建模速度和精度。主成分(PCs)是原始数据的 601 个变量经线性组合得到的变量,各个 PCs 之间是正交的,它们是根据方差大小进行排序的,即方差最大的为第 1 主成分(PC1),次之为第 2 主成分(PC2),依次类推。主成分可代表原始光谱数据的有用信息,并大大降低原始光谱数据的维度。经主成分分析光谱数据后得到前 14 个主成分贡献率如表 2 所示。

前 14 个主成分的累计可信度达到 98.124%，说明主成分分析是一种非常有效的数据挖掘方法，

表 2 前 14 个主成分的累积贡献率

Tab.2 PCs and accumulative reliabilities %

主成分	累积贡献率	主成分	累积贡献率
PC1	68.609	PC8	96.215
PC2	81.763	PC9	96.678
PC3	90.292	PC10	97.086
PC4	92.841	PC11	97.388
PC5	94.212	PC12	97.667
PC6	95.146	PC13	97.912
PC7	95.704	PC14	98.124

它把原来的 601 个波长变量压缩成了彼此正交的新变量,这 14 个新变量彼此间是互不影响的,而且能代表绝大部分原变量包含的信息。图 3 表示 150 个建模样本的第 1、2、3 主成分的得分图。前 3 个主成分的累积贡献率达到了 90.292%。从图 3 中可以看出,150 个样本基本上可以被归为 4 类,4 种病害严重度的大部分大豆豆荚是可以从图中检测出来的,尤其是完全健康的样本和病害严重度 50% 的样本分界线非常明显,而少量大豆豆荚交错在一起,很难用肉眼区分大豆豆荚的病害严重度。由此可见,主成分分析方法适用于鉴别特征差别比较大的样本,对于差别甚微的样本还是较难准确地检测,因此,要想更加准确地鉴别大豆豆荚的病害严重度还需要建立定量分析模型。

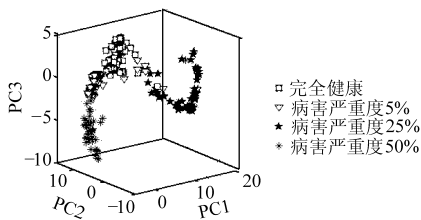


图 3 前 3 个主成分的得分图

Fig.3 Scores plots of PC1, PC2 and PC3

2.4 连续投影算法分析

从提高建模效率确定最佳主成分组合的角度考虑引进了一种新的最佳主成分确定的方法——连续投影算法(SPA)^[12-13],并且把它应用于大豆豆荚炭疽病病害严重度预测模型的最佳主成分确定。连续投影算法能够从大量的光谱信息中充分寻找含有最低限度的冗余信息的变量组,使得变量之间的共线性达到最小。同时能大大减少建模所需变量的个数,提高建模的速度和效率。SPA 选择不同波长数的均方根误差 E_{RMSE} 分布如图 4 所示,图中黑色实心圆点表示所选到的波长数,此时 E_{RMSE} 为 0.3778。由

图 4 可以看出,选取 8 个有效波长时, E_{RMSE} 达到一个低点,以后 E_{RMSE} 趋于平滑,因此确定从 601 个波长中选择出其中的 8 个有效波长。这 8 个波长的分布情况如图 5 所示,其中竖线表示选中的波长。通过 SPA 提取的 8 个有效波长分别为 403、411、415、441、445、447、553 和 715 nm。

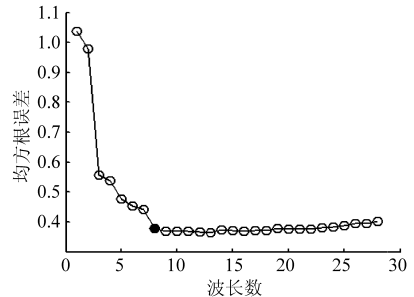


图 4 SPA 选择不同波长数的均方根误差

Fig.4 RMSE plot of number of selected variables by SPA

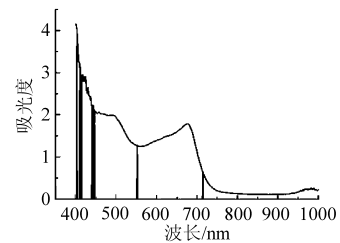


图 5 8 个有效波长的分布

Fig.5 Eight wavelengths selected by SPA

2.5 BPNN 定量分析

大豆豆荚的光谱数据与对应的病害严重度之间是一种非线性的映射关系,为此应用人工神经网络建立大豆豆荚炭疽病病害严重度的检测模型。BP 神经网络是一个强有力的学习系统,能够实现输入与输出之间的高度非线性映射。

通过主成分分析,将提取到的 14 个主成分代替原始光谱反射率作为 BPNN 的输入进行建模。用 0、1、2 和 3 分别代表完全健康、病害严重度 5%、25% 和 50% 的大豆豆荚。通过调整网络参数得到最优的网络结构,从而得到最优的预测模型^[14]。经过反复实验得到的最优网络结构为:输入层节点为 14 个,隐含层节点为 10 个和输出层节点为 1 个的 3 层 BPNN 模型。通过对 150 个样本进行学习训练,设定允许误差为 0.0001,最大迭代次数为 1000 次,最小训练速度为 0.1, Sigmoid 参数为 0.9,数据进行标准化转换,对 50 个未知样本进行预测,拟合残差为 7.86296×10^{-4} 。结果表明,当阈值为 ± 0.5 时,检测准确率达到 84%;当阈值为 ± 0.2 时,检测准确率达到 70%。

将 SPA 得到的 8 个有效变量作为 BPNN 的输入,建立鉴别模型。具体的操作方法如同 PCA-BPNN 模型,拟合残差为 7.75861×10^{-4} 。结果表

明,当阈值为 ± 0.5 时,检测准确率达到 90%;当阈值为 ± 0.2 时,检测准确率达到 84%,能满足田间实际应用的要求。同样是用 BPNN 进行建模,SPA 提取的特征变量优于 PCA 提取的特征变量,而且 SPA 提取的特征变量数也少于 PCA 提取的特征变量数,这说明 SPA 是一种非常有效的提取特征波长的方法。

为了研发更加便捷可靠的基于光谱的植物病害鉴别仪器,尝试更少的特征波长建立相关的 BPNN 模型,通过检测准确率来探测该方法的可行性。结果表明,利用其中的 411、445、553 和 715 nm 4 个有效波长,再次经 BPNN 分析处理后,对大豆豆荚炭疽病病害严重度的鉴别准确率达到 72%。这个研究结果,为室外条件下的大豆炭疽病病害严重度的鉴别应用提供了理论依据。后续研究将进一步提高应用特征波长的模型的鉴别准确度,同时将通过室外实验对所建模型进行优化、增强抗干扰性,满足田间实际应用的要求。

3 结束语

本文运用可见/近红外光谱技术对植物病害严重度的检测进行了研究。通过对 3 种不同预处理方法的比较,认为 SNV 预处理后的 PLS 模型最优。在 SNV 预处理下,通过主成分分析和连续投影算法分别提取最佳主成分和有效波长并相应地建立 PCA-BPNN 和 SPA-BPNN 模型,当阈值为 ± 0.5 时,检测准确率分别为 84% 和 90%。同时实验结果还表明,主成分分析法和连续投影算法均可用于对大量光谱数据进行压缩且不损失原有光谱数据的信息含量。将压缩后的数据作为神经网络的输入,提高了训练速率和鉴别的准确率,但是两者比较而言,无论压缩后得到的有效变量还是鉴别的准确率,SPA 的效果都要优于 PCA,这说明 SPA 是一种非常有效的提取特征波长的方法。说明运用可见/近红外光谱技术可以快速、准确地对大豆豆荚炭疽病病害严重度进行检测。

参 考 文 献

- 1 楼兵干,陈吴健,林钗,等. 一种新大豆豆荚炭疽病症状类型及其病原鉴定[J]. 植物保护学报,2009,36(3):229~233.
Lou Binggan, Chen Wujian, Lin Chai, et al. A new symptom type of soybean pod anthracnose and identification of its pathogen[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2009,36(3):229~233. (in Chinese)
- 2 陈吴健,楼兵干,王国荣,等. 12 种杀菌剂对大豆豆荚炭疽病病原菌的室内药效试验[J]. 浙江农业科学,2007(6):707~709.
- 3 孙志峰,楼兵干,王国荣,等. 大豆豆荚炭疽病菌生物学特性[J]. 浙江农业学报,2008,20(6):432~436.
Sun Zhifeng, Lou Binggan, Wang Guorong, et al. Biological characteristics of the pathogen of soybean pod anthracnose, *Colletorichum truncatum*[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2008,20(6):432~436. (in Chinese)
- 4 黄木易,王纪华,黄文江,等. 冬小麦条锈病的光谱特征及遥感监测[J]. 农业工程学报,2003,19(6):154~158.
Huang Muyi, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Hyperspectral character of stripe rust on winter wheat and monitoring by remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(6):154~158. (in Chinese)
- 5 吴迪,冯雷,张传清,等. 基于可见/近红外光谱技术的茄子叶片灰霉病早期检测研究[J]. 红外与毫米波学报,2007,26(4):269~273.
Wu Di, Feng Lei, Zhang Chuanqing, et al. Early detection of gray mold (*cinerea*) on eggplant leaves based on Vis/Near infrared spectra[J]. Infrared Millim Waves, 2007,26(4):269~273. (in Chinese)
- 6 Bravo C, Moshou D. Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(22): 137~145.
- 7 Malthus T J, Maderia A C. High resolution spectro radiometry: spectral reflectance of field bean leaves infected by botrytis fabae[J]. Remote Sensing of Environ, 1993,45(1):107~116.
- 8 Adams M L, Philpot W D, Norvell W A, et al. Yellowness index and application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999,20(18):3663~3675.
- 9 Muir Y, Porteous R L, Wastie R L. Experiments in the detection of incipient diseases in potato tubers by optical methods[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27(2): 131~138.
- 10 Bona M T, Andres J M. Application of chemometric tools for coal classification and multivariate calibration by transmission and drift mid-infrared spectroscopy[J]. Analytica Chimica Acta, 2008,624(1):68~78.
- 11 He Y, Feng S J, Deng X F, et al. Study on lossless discrimination of varieties of yogurt using the visible/NIR-spectroscopy [J]. Food Research International, 2006,39(6): 645~650.

107 ~ 113.

Wang Xiaosen, Meng Zhaojiang, Duan Aiwang, et al. Mechanism and methodology for monitoring tomato water content based on stem diameter variation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 107 ~ 113. (in Chinese)

- 12 张平,汪有科,湛景武,等. 充分灌溉条件下桃树茎直径最大日收缩量模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 38 ~ 43.
Zhang Ping, Wang Youke, Zhan Jingwu, et al. Simulation of stem diameter maximum daily shrinkage for peach under full irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 38 ~ 43. (in Chinese)
- 13 李晓彬,汪有科,张平. 充分灌溉下梨枣树茎直径动态变化及 MDS 影响因子的通径分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 88 ~ 93.
Li Xiaobin, Wang Youke, Zhang Ping. Dynamic changes of pear jujube stem diameter and path analysis of MDS influencing factors with full irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 88 ~ 93. (in Chinese)
- 14 唐启义. DPS 数据处理系统[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- 15 Goldhamer D A, Fereres E. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors[J]. Irrigation Science, 2004, 23(1): 11 ~ 19.

(上接第 163 页)

- 7 Emma C, Elena V, Claudio C. Physico chemical characterization and stability of inulin gels[J]. European Food Research and Technology, 2007, 225(1): 85 ~ 94.
- 8 彭桂兰,陈晓光,吴文福,等. 玉米淀粉水分吸附等温线的研究及模型建立[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 176 ~ 179.
Peng Guilun, Chen Xiaoguang, Wu Wenfu, et al. Water-sorption isotherms for corn starch and their model developments[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 176 ~ 179. (in Chinese)
- 9 霍树春,李锋,李建科,等. 不同比表面积山梨醇粉体的吸湿性实验研究[J]. 食品科学, 2007, 29(9): 83 ~ 85.
Huo Shuchun, Li Feng, Li Jianke, et al. Study on hygroscopicity of different specific surface area of sorbitol[J]. Food Science, 2007, 29(9): 83 ~ 85. (in Chinese)
- 10 封明艳,许晨,易瑞灶,等. 硫酸氨基葡萄糖吸湿性研究[J]. 中国海洋药物杂志, 2007, 26(6): 1 ~ 4.
Feng Mingyan, Xu Chen, Yi Ruizao, et al. Studies on the hygroscopicity of glucosamine sulfate powder[J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2007, 26(6): 1 ~ 4. (in Chinese)
- 11 丁志平,乔延江. 不同粒径黄连粉体的吸湿性实验研究[J]. 中国实验方剂学杂志, 2004, 10(3): 5 ~ 7.
Ding Zhiping, Qiao Yanjiang. Study on hygroscopicity of different particle size of rhizome coptides[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2004, 10(3): 5 ~ 7. (in Chinese)
- 12 Sébastien N R, Michel P, Christian F, et al. Effect of water uptake on amorphous inulin properties[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 922 ~ 927.
- 13 Ronkart S, Blecker C, Fournies C, et al. Determination of physical changes of inulin related to sorption isotherms: an X-ray diffraction modulated differential scanning calorimetry and environmental scanning electron microscopy study [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 63(2): 210 ~ 217.
- 14 André I, Putaux J L, Chanzy H, et al. Single crystals of inulin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 1996, 18(3): 195 ~ 204.
- 15 Ronkart S N, Paquot M, Blecker C S, et al. Impact of the crystallinity on the physical properties of inulin during water sorption[J]. Food Biophysics, 2009, 4(1): 49 ~ 58.
- 16 Glibowski P, Pikus S. Amorphous and crystal inulin behavior in a water environment[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 635 ~ 639.

(上接第 179 页)

- 12 Wu D, Wu H X, Cai J B, et al. Classifying the species of exopalaemon by using visible and near infrared spectra with uninformative variable elimination and successive projections algorithm[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(6): 423 ~ 427.
- 13 Dantas H A, Galvao R K H, Araujo M C U, et al. A strategy for selecting calibration samples for multivariate modeling[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2004, 72(1): 83 ~ 91.
- 14 罗一帆,郭振飞,朱振宇,等. 近红外光谱测定茶叶中茶多酚和茶多糖的人工神经网络模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(8): 1 230 ~ 1 233.
Luo Yifan, Guo Zhenfei, Zhu Zhenyu, et al. Studies on ANN models of determination of tea polyphenol and amylose in tea by near-infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(8): 1 230 ~ 1 233. (in Chinese)